



臭氧光催化氧化工艺处理工业废水的对比研究

冯雷雷

(杨凌职业技术学院 药物与化工分院, 陕西咸阳 712100)

[摘要] 在 pH=3、 H_2O_2 与硝基酚类化合物物质的量比为 3:1、 $\text{Fe}(\text{III})$ 与硝基酚类化合物物质的量比为 0.1:1 的条件下,以特征污染物硝基酚类化合物的降解率及 TOC 去除率为评价指标,对比了 UV/O_3 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 3 种臭氧光催化氧化工艺处理 DDNP 生产废水的效果。实验结果表明,反应时间 1 h 时经 3 种工艺处理后的 DDNP 生产废水出水的色度和 TOC 均可达到《兵器工业水污染物排放标准 火工药剂》(GB 14470.2—2002)排放标准; UV/O_3 体系中 H_2O_2 或 $\text{Fe}(\text{III})$ 的加入对硝基酚类化合物的降解影响不大,而对 TOC 去除率具有明显的提升。实验条件下 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 工艺的处理效果最优,反应时间 1 h 时其出水无色,TOC 去除率为 96%, $m(\text{BOD}_5)/m(\text{COD})$ 由 0.06 提升到 0.46,且出水硝基酚类化合物满足 GB 14470.2—2002 排放标准。经计算,3 种工艺的工艺效率分别为 27%、35%、52%,更高的工艺效率意味着更低的工艺成本,因此 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 工艺的经济性最优。

[关键词] 臭氧催化; UV/O_3 ;TOC 去除率;工艺效率;工业废水

[中图分类号] X703.1;TQ031 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)03-0138-06

Comparative study on the treatment of industrial wastewater by ozone photocatalytic oxidation process

FENG Leilei

(School of Pharmaceutical and Chemical Industry, Yangling Vocational and Technical College, Xianyang 712100, China)

Abstract: Under the conditions of pH=3, the molar ratio of H_2O_2 to nitrophenols was 3:1, and the molar ratio of $\text{Fe}(\text{III})$ to nitrophenols was 0.1:1, the degradation rate of characteristic pollutants nitrophenols and TOC removal rate as the evaluation index, the effects of UV/O_3 , $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ and $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ photocatalytic oxidation processes on the treatment of DDNP production wastewater were compared. The experimental results showed that the chromaticity and TOC of the effluent of DDNP production wastewater treated by three processes at the reaction time of 1 h could meet the discharge standard of Discharge Standard for Water Pollutants from Ordnance Industry Initiating Explosive Material and Relative Composition (GB 14470.2—2002). The addition of H_2O_2 or $\text{Fe}(\text{III})$ in UV/O_3 system had little effect on the degradation of nitrophenols, but significantly improved the removal rate of TOC. Under the experimental conditions, the $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ process had the best treatment effect. When the reaction time was 1 h, the effluent was colorless, the removal rate of TOC was 96%, $m(\text{BOD}_5)/m(\text{COD})$ increased from 0.06 to 0.46, and the nitrophenol compounds in the effluent also met the GB 14470.2—2002 emission standard. Through calculation, the process efficiency of the three processes was 27%, 35% and 52%, respectively. Higher process efficiency meant lower process cost, so the economy of $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ process was optimal.

Key words: ozone catalysis; UV/O_3 ; TOC removal rate; process efficiency; industrial wastewater

随着工业 4.0 时代的到来,工业产品的种类和数量剧增,工业生产废水的成分越来越复杂,呈现出毒性大、色度高、难降解等特点。另外,国家层面提出绿水青山就是金山银山的环保口号,人们对环保的要求越来越高,工业废水的处理越来越受到重视。臭氧催化氧化

作为一种高级氧化法,其能通过强化羟基自由基($\cdot\text{OH}$)的产生,使废水中大多数难降解有机污染物完全分解为 CO_2 、 H_2O 和无机离子,具有绿色、无二次污染的优势^[1-2]。与单独的臭氧氧化技术相比,臭氧催化氧化具有更高的臭氧利用效率,可进一步提高难降解废水的

可生化性,降低其毒性^[3]。臭氧催化氧化技术包含光催化(UV/O₃)、碱催化(O₃/H₂O₂)、多相催化(O₃/固体催化剂)等工艺,其中光催化臭氧氧化处理技术因具有杀菌能力强、作用快、效果好等特点而备受关注,其原理为:水中的溶解臭氧在紫外光的照射下,产生超氧负离子(O₂⁻)、激发基态氧分子(O₂^{*})、H₂O₂以及·OH等活性物质,这些物质通过破坏有机物分子的结构,使大分子有机物分解成小分子物质,从而达到降解有机污染物的目的^[4]。

二硝基重氮酚(DDNP)是目前国内产量最大、应用最广的起爆药,其生产过程中排出的废水主要来自还原、重氮化和洗涤工序,每生产1 kg DDNP产品大约产生200~300 kg废水,废水产生量较大。废水中含带有重氮基、硝基等难生物降解基团的污染物,成分复杂、色度高、毒性大^[5]。为控制该类废水污染,我国制订了《兵器工业水污染物排放标准 火工药剂》(GB 14470.2—2002),其规定满足排放要求的该类废水中主要特征污染物硝基酚类化合物的质量浓度≤6.0 mg/L。

本研究以DDNP生产废水为处理对象,对比研究UV/O₃、UV/O₃/H₂O₂、UV/O₃/Fe(Ⅲ)3种臭氧光催化氧化工艺对于难降解废水的处理效果,探究其各自的氧化作用机理,分析3种工艺的处理效率,以期作为臭氧光催化氧化处理工业废水的工艺选择提供参考。

1 实验部分

1.1 废水水质

实验废水取自陕西省铜川矿务局一五三厂DDNP生产废水,废水经消爆后的水质见表1。

表1 DDNP生产废水水质

Table 1 Water quality of DDNP production wastewater

pH	色度/倍	TOC/(mg·L ⁻¹)	m(BOD ₅)/m(COD)	硝基酚/(mg·L ⁻¹)	外观
7.92	14 200	405.73	0.06	101.20	黑褐色

1.2 实验装置

实验装置见图1。氧化反应在高300 mm、内径74 mm的有机玻璃反应器中进行,反应器配备25 W低压紫外灯,可发射254 nm单色光,反应器安装有水套,内置循环水可将反应器温度恒定在25℃。采

用臭氧发生器(哈尔滨久久化学工程技术有限公司,DHX-SS-1G型),利用干燥的空气产生臭氧,空气流量控制在150 L/h。进出反应器的臭氧浓度均采用MOT500臭氧在线检测仪进行实时监测,进料气体的臭氧质量浓度保持在9.50 mg/L,尾气采用KI溶液吸收。

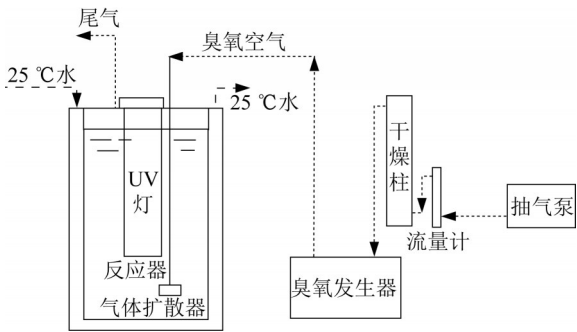


图1 实验装置

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

1.3 实验方法

除硝基酚类化合物外,DDNP废水中还含有较多的硫代硫酸钠、碳酸钠、氯化钠等无机污染物^[6]。相比化学需氧量(COD),总有机碳(TOC)可以识别有机碳和无机碳之间的区别,另外体系中H₂O₂的存在对COD的测定具有干扰作用,使得COD测定值偏高^[7],因此实验中以TOC去除率替代常用的COD去除率用以表征废水处理的综合效果。

UV/O₃工艺处理DDNP生产废水。量取1 000 mL废水,将其全部倒入反应器中,利用H₂SO₄和NaOH分别调节酸碱性至设定值,开启臭氧发生器和紫外灯计时反应。记录1 h内的进出臭氧质量浓度,并每隔10 min取20 mL水样用0.45 μm滤膜进行过滤后,测定水样TOC、硝基酚类化合物含量等指标。

UV/O₃/H₂O₂或UV/O₃/Fe(Ⅲ)工艺处理DDNP生产废水。量取1 000 mL废水,将其全部倒入反应器中,然后加入一定量的氧化剂H₂O₂或Fe(Ⅲ),待氧化剂与废水混合均匀后,利用H₂SO₄和NaOH分别调节酸碱性至设定值,开启臭氧发生器和紫外灯计时反应。记录1 h内的进出臭氧质量浓度,并每隔10 min取20 mL水样用0.45 μm滤膜进行过滤后,测定水样TOC、硝基酚类化合物含量等指标。

1.4 分析方法

依据《水质色度的测定 稀释倍数法》(GB 11903—1989)测定水样色度;采用德国元素液体 TOC 分析仪测定水样 TOC;依据《化学需氧量的测定 重铬酸钾法》(GB 11914—1989)测定水样 COD;依据《水质五日生化需氧量的测定 稀释与接种法》(HJ 505—2009)测定水样 BOD₅;依据《十六烷基三甲基溴化铵分光光度法》(GB 14470.2—2002)测定硝基酚类化合物含量。

依照文献[8],定义臭氧光催化氧化效率为工艺效率,用 TOC 去除质量与消耗的臭氧质量之比来表示,其具体计算见式(1)。

$$\text{工艺效率} = \frac{\Delta\text{TOC} \times \text{废水总体积}}{\frac{1}{8} \times [\text{O}_3] \times \text{产生臭氧的空气体积}} \times 100\% \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 臭氧光催化氧化工艺最佳 pH 的确定

为重点对比酸性、中性和碱性条件下臭氧光催化氧化工艺的处理效果,参照文献[8]在废水初始 pH 为 3、6、9 条件下,采用 UV/O₃ 工艺对废水进行处理,废水主要特征污染物硝基酚类化合物的降解率变化见图 2。

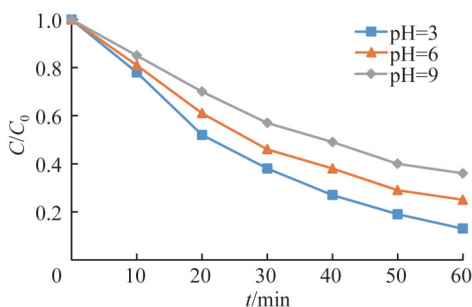


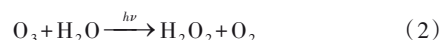
图 2 pH 对硝基酚类化合物降解率的影响

Fig. 2 Effect of pH on the degradation rate of nitrophenols

由图 2 可以观察到,废水中硝基酚类化合物在酸性条件下比在中性及碱性条件下降解速率快。依据“O₃ 分解成·OH 的速率会随着 pH 的增加而增加”^[9],可推测该实验中硝基酚的降解主要是通过 O₃ 的直接氧化作用完成^[8]。因此碱性条件下 O₃ 的分解会消耗用于直接氧化的 O₃ 的量,从而不利于硝基酚的降解。依据实验结果,后续实验废水初始 pH 均确定为 3。

2.2 UV/O₃/H₂O₂ 工艺 H₂O₂ 投加量的确定

UV/O₃ 工艺对于水中一般难降解污染物的氧化分为 2 个阶段,第一阶段中在紫外光的照射下水中臭氧光解生成 H₂O₂〔式(2)〕,H₂O₂ 光解又产生·OH〔式(3)〕;在反应的第二阶段,前一阶段产生的·OH 进入自由基循环反应,水中的有机物参与·OH 的循环反应,同时 O₃ 在光照作用下产生有较强催化作用的 O₂^{·-}〔式(4)〕,这时·OH 主要由 O₂^{·-} 与水反应生成〔式(5)〕。

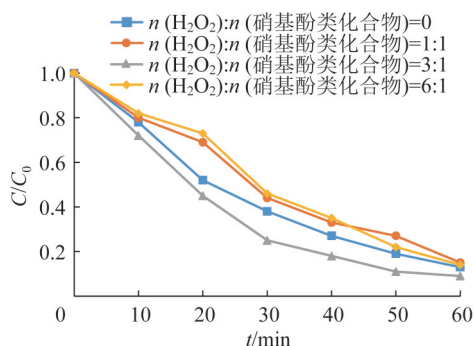
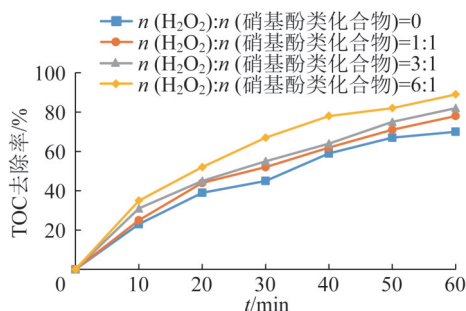


UV/O₃/H₂O₂ 工艺被认为是高污染废水较为有效的处理方法之一^[10],该工艺向 UV/O₃ 体系中加入 H₂O₂,H₂O₂ 会部分解离为 HO₂⁻,而 HO₂⁻ 能加快 O₃ 在水中分解产生·OH,使污染物被快速和完全矿化。

为确定关键工艺参数 H₂O₂ 的投加量,在 n(H₂O₂):n(硝基酚类化合物)分别为 1:1、3:1、6:1 时,采用 UV/O₃/H₂O₂ 工艺处理 DDNP 生产废水考察其对废水中硝基酚的降解率和 TOC 去除率,并与不添加 H₂O₂ 的 UV/O₃ 工艺处理效果进行对比,结果见图 3 和图 4。

由图 3 可看出,对比 UV/O₃ 工艺,当 n(H₂O₂):n(硝基酚类化合物)=3:1 时,采用 UV/O₃/H₂O₂ 工艺对硝基酚进行降解,反应时间 1 h 时硝基酚降解率由 87% 提高到 94%,而在 n(H₂O₂):n(硝基酚类化合物)为 6:1 和 1:1 时硝基酚的降解会受到轻微抑制。推测其原因,可能是尽管 H₂O₂ 投加量的增加会导致体系中·OH 浓度的增加,但是硝基酚降解的主要途径是臭氧直接氧化,H₂O₂ 投加量较少或较多时臭氧的消耗影响了硝基苯类化合物的降解,但 H₂O₂ 投加量为 3:1 时,推测由于 H₂O₂ 阻碍了式(2)所示臭氧光解反应的正向进行,因而对硝基酚的降解起到了积极作用。

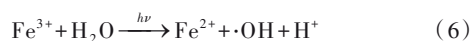
由图 4 可看出,当不添加 H₂O₂ 时 UV/O₃ 工艺的 TOC 去除率明显低于 UV/O₃/H₂O₂ 工艺的值。当 n(H₂O₂):n(硝基酚类化合物)由 1:1 增加到 6:1 时,氧化处理 1 h 废水 TOC 去除率由 78% 增加到 89%。

图3 H_2O_2 投加量对硝基酚类化合物降解率的影响Fig. 3 Effect of H_2O_2 dosage on the degradation rate of nitrophenols图4 H_2O_2 投加量对TOC去除率的影响Fig. 4 Effect of H_2O_2 dosage on TOC removal rate

这是因为在UV辐射的条件下, H_2O_2 投加量的增加会提高体系中自由基的生成浓度, 从而提高有机物的去除率。同时考虑到 H_2O_2 投加量较多时, 硝基酚类化合物降解会受到抑制, 因此当 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{硝基酚类化合物})=3:1$ 时, UV/ O_3 / H_2O_2 工艺的综合处理效果较佳。

2.3 UV/ O_3 /Fe(III)工艺Fe(III)投加量的确定

UV/ O_3 /Fe(III)工艺原理是: 向UV/ O_3 体系中加入Fe(III), Fe(III)在紫外光和近紫外光照射下与溶液中的水分子发生光氧化还原反应, 产生Fe(II)和 $\cdot\text{OH}$ [式(6)]; Fe(II)引发臭氧分解产生超氧自由基 $\text{O}_2^{\cdot-}$, 接着发生电子转移生成 $\text{O}_3^{\cdot-}$, 最后生成强氧化性的 $\cdot\text{OH}$; 另外, 有机污染物被 O_3 氧化产生含氧中间体, 即具有羧基官能团的中间体, 其可与Fe(III)反应形成具有光活性的络合物, 并在紫外光解时产生 CO_2 、有机自由基和亚铁离子[式(7)]^[10], 在没有 $\cdot\text{OH}$ 参与的情况下促进有机污染物的矿化。



为确定关键工艺参数Fe(III)的投加量, 在 $n(\text{Fe(III)}):$

$n(\text{硝基酚类化合物})$ 分别为0.1:1、1:1、3:1时, 采用UV/ O_3 /Fe(III)工艺处理DDNP生产废水考察其对废水中硝基酚的降解率和TOC去除率, 并与不添加Fe(III)的UV/ O_3 工艺处理效果进行对比, 结果见图5和图6。

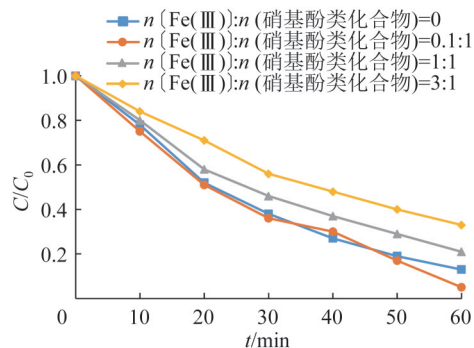


图5 Fe(III)投加量对硝基酚类化合物降解率的影响

Fig. 5 Effect of Fe(III) dosage on the degradation rate of nitrophenols

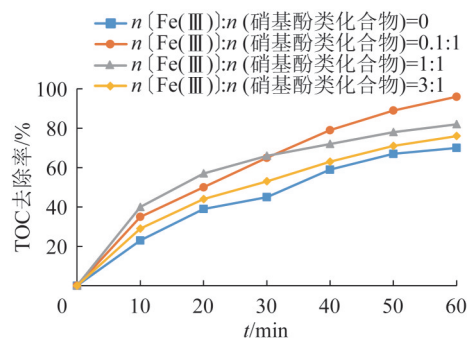


图6 Fe(III)投加量对TOC去除率的影响

Fig. 6 Effect of Fe(III) dosage on TOC removal rate

由图5可以看出, 以UV/ O_3 工艺为基准, 当 $n[\text{Fe(III)}]:n(\text{硝基酚类化合物})=0.1:1$ 时, 硝基酚降解速率基本没有变化, 但当投加比例增加到1:1和3:1时, 硝基酚的降解却被明显抑制, 这一结果同样可以通过硝基酚的降解主要源于直接臭氧氧化作用来解释。

由图6可以看出, 对于废水TOC的去除, UV/ O_3 /Fe(III)工艺的处理效果明显优于UV/ O_3 工艺的处理效果, 这是因为三价铁离子的加入促进了自由基的生成, 因而增强了对废水中TOC的去除。另外, 由图6还可知, 少量Fe(III)的投加即可明显提升体系对TOC的去除效果, 当 $n[\text{Fe(III)}]:n(\text{硝基酚类化合物})=0.1:1$ 时, 氧化处理1 h废水TOC去除率达到96%, 而投加较多的铁离子时体系对废水TOC的处理效果变差, 这是因为

实验中使用的铁盐是 FeCl_3 , 含有 Cl^- , 其是一种 $\cdot\text{OH}$ 抑制剂^[11]。因此, 综合考虑图 5 和图 6 的实验结果, 当 $n[\text{Fe}(\text{III})]:n(\text{硝基酚类化合物})=0.1:1$ 时, $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 工艺的处理效果较佳。

为测试 Cl^- 对氧化体系处理效果的影响, 在无 Cl^- 及投加 $\text{Cl}^- [n(\text{Cl}^-):n(\text{硝基酚类化合物})=1:1]$ 条件下, 使用另一种铁盐 $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 在 $\text{Fe}(\text{III})$ 与硝基酚类化合物物质的量比为 1:1 时对废水进行处理, 结果见图 7、图 8。

图 7、图 8 实验结果表明, 无 Cl^- 存在时, 投加硝酸铁后 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 工艺对硝基酚类化合物的降解效果比有 Cl^- 存在时有所提高, 且可获得更高的 TOC 去除率, 实现废水更高度度的矿化。这说明 Cl^- 确实可与硝基酚类化合物竞争存在于介质中的 $\cdot\text{OH}$ 。

2.4 工艺对比

在废水初始 $\text{pH}=3$, $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 工艺中 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{硝基酚类化合物})=3:1$, $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 工艺中 $n[\text{Fe}(\text{III})]:n(\text{硝基酚类化合物})=0.1:1$ 的条件下, 对 UV/O_3 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 3 种工艺处理

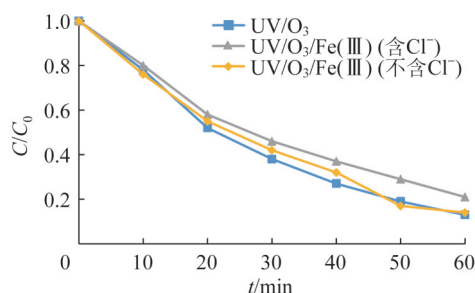


图 7 Cl^- 对硝基酚类化合物降解率的影响

Fig. 7 Effect of Cl^- on the degradation rate of nitrophenols

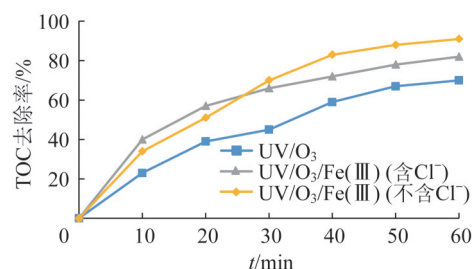


图 8 Cl^- 对 TOC 去除率的影响

Fig. 8 Effect of Cl^- on TOC removal rate

DDNP 生产废水 1 h 的效果进行对比, 结果见表 2。

表 2 3 种工艺废水处理效果对比

Table 2 Comparison of wastewater treatment effects of three processes

工艺组合	出水色度/倍	出水硝基酚/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 TOC/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$m(\text{BOD}_5)/m(\text{COD})$	工艺效率/%
UV/O_3	75	11.13	121.72	0.15	27
$\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$	50	9.11	73.03	0.32	35
$\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$	50	5.06	16.23	0.46	52

由表 2 可知, 在 UV/O_3 工艺基础上投加 H_2O_2 和 $\text{Fe}(\text{III})$ 对硝基酚类化合物的降解影响不大, 但对 TOC 的去除表现出明显的提升效果, 尤其是少量铁离子的加入大大提高了 TOC 的去除率。 UV/O_3 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 3 种工艺在优化条件处理 DDNP 生产废水 1 h 后出水的色度、TOC 均满足 GB 14470.2—2002 排放标准 (色度 ≤ 120 倍, $\text{TOC} \leq 150 \text{ mg/L}$), 但只有 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 工艺的出水硝基酚达到了 GB 14470.2—2002 排放标准 ($\leq 6.0 \text{ mg/L}$)。

此外, UV/O_3 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 3 种工艺处理后废水的可生化性由 0.06 分别提升到 0.15、0.32、0.46, 工艺效率分别为 27%、35%、52%, 表明各体系均能在不同程度上对 DDNP 废水中的难降解有机物进行降解, 而 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 工艺相对于其他工艺则具有更优表现。

3 结论

以特征污染物硝基酚的降解率及 TOC 去除率为评价指标, 在优化条件下对比了 UV/O_3 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 、 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 3 种臭氧光催化氧化工艺处理 DDNP 生产废水的效果, 得到如下结论:

(1) UV/O_3 工艺在 $\text{pH}=3$ 时, 对硝基酚类化合物的降解效果较佳, 碱性条件下, 该工艺对硝基酚类化合物的降解表现出轻微抑制效果。相较于 UV/O_3 工艺, $\text{UV}/\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}_2$ 工艺在 $n(\text{H}_2\text{O}_2):n(\text{硝基酚类化合物})=3:1$ 时, 氧化 1 h 后废水 TOC 去除率有所提升, 而 $\text{UV}/\text{O}_3/\text{Fe}(\text{III})$ 工艺在 $n[\text{Fe}(\text{III})]:n(\text{硝基酚类化合物})=0.1:1$ 时, 氧化 1 h 后废水 TOC 去除率有大幅度的提升, 但这 2 种工艺都没有明显提升特征污染物硝基酚类化合物的降解率。

(2) 针对 DDNP 废水的水质特点, 少量 $\text{Fe}(\text{III})$ 的加

入会提升废水综合处理效果,但需要注意的是,Fe(Ⅲ)投加时Cl⁻的引入或者过量铁离子会抑制·OH的产生,从而降低废水的TOC去除率。

(3)经检测,UV/O₃、UV/O₃/H₂O₂、UV/O₃/Fe(Ⅲ)3种工艺在考察的最佳实验条件下氧化DDNP废水1h后出水的色度、TOC均达到GB 14470.2—2002排放标准,其中UV/O₃/Fe(Ⅲ)工艺表现出最优的处理效果,其出水硝基苯类化合物达到GB 14470.2—2002排放标准,废水 $m(\text{BOD}_5)/m(\text{COD})$ 可由0.06提升到0.46,工艺效率可达52%。

参考文献

- [1] SUI Qian, GEBHARDT W, SCHRÖDER H F, et al. Identification of new oxidation products of bezafibrate for better understanding of its toxicity evolution and oxidation mechanisms during ozonation[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 51(4): 2262–2270.
- [2] 李敏, 付丽亚, 谭煜, 等. 臭氧催化氧化在工业废水处理中的应用进展[J]. 工业水处理, 2022, 42(1): 56–65.
LI Min, FU Liya, TAN Yu, et al. Application progress of catalytic ozonation in industrial effluents treatment[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(1): 56–65.
- [3] 王盈盈, 张晶, 潘立卫, 等. 臭氧催化氧化工艺处理工业废水的研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(8): 1914–1919.
WANG Yingying, ZHANG Jing, PAN Liwei, et al. Review on research of catalytic ozonation industrial wastewater[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(8): 1914–1919.
- [4] 左泽浩, 杨维本, 杨朕, 等. 臭氧高级氧化法处理化工废水的进展研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(6): 113–117.
ZUO Zehao, YANG Weiben, YANG Zhen, et al. Research on chemical wastewater treatment with advanced oxidation processes[J]. Environmental Science and Management, 2017, 42(6): 113–117.
- [5] 闭应培. DDNP废水处理方法浅析[J]. 煤矿爆破, 2014(2): 12–14.
BI Yingpei. Discussion on the DDNP waste-water treatment methods[J]. Coal Mine Blasting, 2014(2): 12–14.
- [6] 金菁. 混凝-吸附处理DDNP废水的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2008.
JIN Jing. Study on treatment of wastewater produced by DDNP production with coagulation and adsorption[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2008.
- [7] 李莉, 李友铤, 梁嘉良, 等. 化学需氧量测定中H₂O₂干扰消除方法[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(9): 47–53.
LI Li, LI Youhuang, LIANG Jialiang, et al. Elimination method of H₂O₂ interference in determination of COD_{Cr}[J]. Experimental Technology and Management, 2021, 38(9): 47–53.
- [8] CONTRERAS S, RODRÍGUEZ M, CHAMARRO E, et al. Oxidation of nitrobenzene by O₃/UV: The influence of H₂O₂ and Fe(Ⅱ). Experiences in a pilot plant[J]. Water Science and Technology, 2001, 44(5): 39–46.
- [9] 倪丽. 催化臭氧氧化处理DDNP废水的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
NI Li. Catalytic oxidation of DDNP wastewater[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2009.
- [10] 冉刚. 基于过硫酸盐和过氧化氢高级氧化体系处理DDNP工业废水的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
RAN Gang. Treatment of DDNP industrial wastewater by advanced oxidation system based on persulfate and hydrogen peroxide[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [11] GOMES J F, QUINTA-FERREIRA M E, COSTA R, et al. Paraben degradation using catalytic ozonation over volcanic rocks[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(8): 7346–7357.

[作者简介] 冯雷雷(1984—), 副教授。E-mail: 330940540@qq.com。

[收稿日期] 2022-12-12(修改稿)